

Determinación de la biomasa foliar mediante modelos de microondas y fotografía hemisférica

Iñigo Molina-Sánchez⁽¹⁾, Estíbaliz Martínez-Izquierdo⁽²⁾, Jesús Velasco Gómez⁽¹⁾ y Águeda Arquero-Hidalgo⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería Topográfica y Cartografía, ETSITGC, Universidad Politécnica de Madrid, Campus SUR, Ctra. de Valencia, km.7, 28031 Madrid, España. Emails: inigo.molina@upm.es, jesus.velasco@upm.es

⁽²⁾ Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, ETSIInf., Universidad Politécnica de Madrid, Campus de Montegancedo s/n, 28660 Madrid, España. Emails: emartinez@fi.upm.es, aarquero@fi.upm.es

Resumen: Uno de los principales valores de la Teledetección activa de microondas, en relación con la frecuencia, es su capacidad para penetrar las cubiertas vegetales y alcanzar la superficie terrestre. Así, es posible extraer determinada información de dichas cubiertas y de las propiedades hidrológicas de la superficie. Toda esta información está contenida en llamado coeficiente de retrodifusión (σ^0). Existen diferentes enfoques para la simulación del dosel. Para caracterizar el dosel vegetal, se ha evaluado en primer lugar un modelo de difusión de biomasa. Posteriormente, se ha aplicado y analizado un modelo simplificado de Transferencia Radiativa. En ambos casos, se han empleado datos obtenidos mediante fotografía hemisférica (DHP).

Palabras clave: biomasa, imágenes SAR, transferencia radiativa, Water Cloud Model, LAI

Determining leaf biomass using microwave models and hemispherical photography

Abstract: One of the main strengths of active microwave remote sensing, in relation to frequency, is its capacity to penetrate vegetation canopies, and reach the ground surface, so that information about the vegetation and hydrological properties of the surface can be extracted. All this information is contained in the so called backscattering coefficient (σ^0). The main vegetation canopy simulation models are based on Radiative Transfer theory, which allows for different approaches. In order to characterize the vegetation canopy, first, a biomass scattering model was assessed. Then, a simplified model based on Radiative Transfer theory was been applied and analyzed. In both cases, the required information was derived from Digital Hemispherical Photography (DHP).

Keywords: biomass, SAR images, radiative Transfer, Water Cloud Model, LAI

1. INTRODUCCIÓN

La Teledetección de microondas es utilizada cada vez con mas frecuencia en las Ciencias de la Tierra para estudios ambientales, hidrológicos, de agricultura, etc., debido a que sus datos y técnicas asociadas son capaces de proporcionar información muy completa sobre aspectos importantes como son: la biomasa, descriptores de los índices del dosel, la humedad del suelo y su rugosidad, así como otras variables relacionadas. Generalmente, en el dominio de microondas, el estudio de la cubierta vegetal requiere evaluar por separado el comportamiento electromagnético de la superficie del suelo y el de la capa de vegetación, así como las propiedades geométricas específicas de sus constituyentes. Los modelos de difusión de la superficie del suelo deben tener en cuenta parámetros estadísticos relativos a su rugosidad, los cuales son responsables de sus propiedades de reflectividad (Ulaby *et al.*, 1986). En la bibliografía está disponible un cierto número de modelos teóricos y empíricos para calcular los valores de estos parámetros (Dubois *et al.*, 1995).

Para describir el comportamiento de la capa de vegetación, se deben definir tanto un modelo geométrico, como las propiedades electromagnéticas de sus constituyentes. Para este fin, se han desarrollado algunos modelos como los basados en la teoría de la Transferencia Radiativa (TR). La principal dificultad reside en definir debidamente las propiedades geométricas y electromagnéticas de los componentes de

vegetación (Wang *et al.*, 1998). Con el fin de superar esta dificultad, se han adoptado modelos semi-empíricos, los cuales pueden adaptarse más convenientemente a determinados escenarios. En este caso, se considera el dosel vegetal como una capa homogénea a una cierta altura por encima de la superficie del terreno. Esta capa se utiliza para calcular la atenuación de la radiación a través de dicha capa. En este sentido, el *Water Cloud Model* o WCM (Ulaby *et al.*, 1986), puede adaptarse de manera eficiente a cualquier medio vegetal y sus parámetros pueden aproximarse por variables más generales, como el contenido total en agua o WTC (*Water Total Content*), o el índice de Área Foliar o LAI (*Leaf Area Index*) del dosel (Macelloni *et al.*, 2001).

El LAI es una variable relevante, ya que, además de expresar un valor biofísico de la vegetación, se considera también un descriptor de la geometría de la hoja y la densidad de la cubierta, y por lo tanto también puede estar relacionado con la biomasa de la copa y/o foliar. En la región de las microondas, se ha demostrado que la evaluación de esta variable está también estrechamente relacionada con la frecuencia del sistema de radar (Ulaby *et al.*, 1986). Las frecuencias altas son dominadas por procesos de difusión en la capa de la copa producida por pequeñas ramas, ramos y hojas en el dosel.

Un objetivo fundamental de este trabajo ha sido relacionar la retrodifusión radar con variables biofísicas de la vegetación adquiridas con un sensor óptico. Otro

punto clave de esta investigación ha sido diferenciar entre LAI verdadero y LAI efectivo, ya que expresan diferentes conceptos de distribución foliar dentro de la copa. Para la observación de estas dos variables se ha empleado la técnica de la fotografía hemisférica debido a sus características de precisión, facilidad de discriminación de los elementos verdes de vegetación de los troncos y ramas (Martínez *et al.*, 2005), y a la existencia de dispositivos relativamente asequibles.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos SAR

La imagen (Figura 1) utilizada en este estudio, ha sido adquirida el 9 de octubre de 2008. El área de trabajo se ubica al Sureste de Madrid ($\phi=40^{\circ}14'$, $\lambda=3^{\circ}29'$). Los datos SAR proceden del sistema RADARSAT 2, y se han registrado con un ángulo de incidencia de $38,5^{\circ}$ en el centro de la escena y una resolución nominal de 8 m en rango y azimut. La frecuencia de microondas de este sistema es de 5,4 GHz (Banda C) y opera en modo polarimétrico completo con los cuatro estados de polarización (HH, HV, VH y VV) que se han procesado como un producto *Single Look Complex* (SLC).

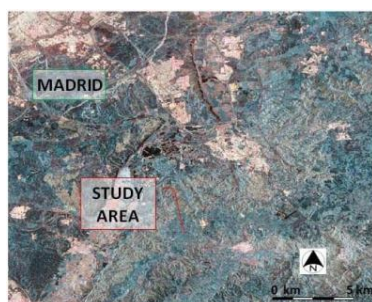


Figura 1. Imagen RADARSAT 2, combinación de PAULI ($A-/S_{HH}+S_{VV}/$, $V-/S_{HV}/$ y $R-/S_{HH}-S_{HV}/$).

2.2. Preprocesado de la imagen

Los datos de partida fueron transformados a coeficientes de retrodifusión, σ^0 . Para ello se aplicó el procedimiento especificado en el documento *Radarsat-2 Product Format Definition - RN-RP-51-2713*, que requiere calibrar los valores de intensidad S_{pq} decodificados mediante una tabla de valores (LUT), suministrada conjuntamente con el producto que contiene la imagen.

2.3. Determinación de los parámetros biofísicos del dosel

Las mediciones de los parámetros físicos de la superficie del suelo y de los parámetros biofísicos de la vegetación se llevaron a cabo sobre 8 unidades de muestreo (UM) previamente seleccionadas. La cubierta analizada en este trabajo es una cubierta de olivar.

Los parámetros físicos del suelo abarcan tanto a la rugosidad de la superficie como a su contenido en humedad. Las medidas de rugosidad han sido realizadas a lo largo de una dirección paralela a la línea de vuelo nominal del satélite, y en la dirección perpendicular a ésta. Para ello se ha dispuesto de un tablero de 1 m de longitud con una cuadrícula de 5x5 cm. De las

distintas mediciones se han obtenido las desviaciones estándar de la altura de los puntos del perfil (σ).

La determinación de la humedad del suelo se ha llevado a cabo por medio de un cilindro metálico de 5 cm de diámetro y 5 cm altura, el que ha sido insertado en los primeros 5 cm de la superficie del suelo. Se obtuvieron valores de humedad volumétrica, los cuales junto con la información de textura del suelo se utilizaron para calcular la constante dieléctrica del suelo por medio del modelo de Dobson-Peplinsky (Dobson *et al.*, 1985). Posteriormente, estos valores se han utilizado como variables de entrada para simular el coeficiente de retrodifusión, σ^0 , correspondiente a la superficie del suelo.

Los valores de los parámetros biofísicos de la vegetación se han obtenido a través de fotografías hemisféricas. Este proceso se llevó a cabo en cada UM, de donde existían valores de rugosidad del suelo y humedad. Esta técnica permite obtener valores para el LAI verdadero y efectivo. Para este estudio se ha empleado una cámara fotográfica digital con objetivo super gran angular. La metodología de muestreo se basa en la estrategia propuesta en (Weiss *et al.*, 2004), los cuales sugieren un disposición de fotografías por transectos.

2.4. Modelos de difusión de microondas

En este trabajo se ha considerado la modelización de la cubierta vegetal desde dos enfoques diferentes. Primeramente, se ha evaluado un modelo logarítmico de estimación de biomasa. Posteriormente, se ha abordado un procedimiento basado en la teoría de la TR.

El modelo de biomasa se basa en una relación cuadrática entre la biomasa y los distintos estados de polarización del sistema de observación radar. Dada la relación existente entre la biomasa foliar y el LAI, se analiza en qué medida es posible utilizar esta variable en dichos modelos. Para ello se ha considerado que la biomasa foliar es proporcional al LAI o $B_f \propto LAI$. El modelo de biomasa presentado en esta sección, es una versión similar al modelo de Saatchi (Saatchi & McDonald, 1997). Su expresión viene dada en la ecuación 1:

$$\ln(B_f) = a_0 + a_1 \sigma_{HV}^0 + a_2 (\sigma_{HV}^0)^2 + b_1 \sigma_{HH}^0 + b_2 (\sigma_{HH}^0)^2 + c_1 \sigma_{VV}^0 + c_2 (\sigma_{VV}^0)^2 \quad (1)$$

donde a_i , b_i y c_i son los coeficientes específicos de la cubierta vegetal analizada y deben determinarse por regresión no lineal. Esta expresión tiene la ventaja de que puede ser aplicada individualmente a los distintos tipos de biomasa de la cubierta: troncos, ramas, hojas, etc. Algunos modelos de difusión de microondas necesitan incorporar una simulación de la superficie del suelo debajo de la capa de vegetación, para la descripción del dosel vegetal. Esta superficie del suelo se modela como una superficie dieléctrica. Esta tarea se ha realizado mediante la aplicación del modelo de retrodifusión de superficie de Dubois (Dubois *et al.*, 1995) que tiene en cuenta los dos estados de copolarización HH y VV. Siguiendo con algunos aspectos metodológicos de la modelización, hay que tener en

cuenta que en los modelos teóricos de difusión TR para la vegetación, esta suele ser tratada como un medio discreto sobre la superficie del suelo, que es considerada como una superficie dieléctrica continua. Esta aproximación se modelizó mediante una aproximación del *Water Cloud Model* o WCM. Los modelos basados en el WCM consideran las contribuciones del suelo y la vegetación por separado (Figura 2.a y 2.b).

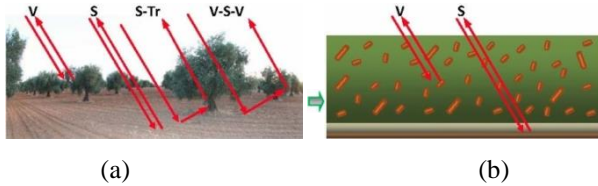


Figura 2. (a) Interacciones producidas entre las diferentes contribuciones (V: vegetación, S: suelo, Tr: tronco); (b) generalización de la cubierta vegetal.

De acuerdo con lo comentado, el coeficiente total de retrodifusión σ^0 se expresa por la ecuación 2.

$$\sigma^0 = \sigma_{\text{vegetación}}^0 + \sigma_{\text{suelo}}^0 \quad (2)$$

Esta expresión puede ser representada por el WCM. Por otra parte, el LAI se utiliza en este modelo como descriptor de la capa de vegetación, y se integra de la siguiente expresión de la ecuación 3.

$$\sigma_{pp}^0 = A \times \left[1 - e^{(-2B \times \text{LAI} / \cos \theta_i)} \right] \times \cos \theta_i + \left(C + D \cdot m_s \right) \times e^{(-2B \times \text{LAI} / \cos \theta_i)} \quad (3)$$

suelo $\left(\sigma_{pp-suelo}^0 \right)$

donde:

- A, B = parámetros específicos para cubierta vegetal
- C, D = parámetros específicos para suelo
- m_s = contenido en humedad del suelo
- θ_i = ángulo de incidencia local
- pp = polarización vertical (vv) u horizontal (hh)

C y D mantienen una relación lineal con el contenido de humedad. La contribución del suelo ha sido sustituida por la obtenida invirtiendo un modelo de retrodifusión de Rayleigh. Los parámetros A y B son evaluados también mediante una regresión no lineal y una vez obtenidos, la expresión puede ser invertida para extraer los valores de LAI según la ecuación 4.

$$\text{LAI} = -\frac{\cos \theta_i}{2B} - \ln \left(\frac{\sigma_{pp}^0 - A \cdot \cos \theta_i}{\sigma_{pp-suelo}^0 - A \cdot \cos \theta_i} \right) \quad (4)$$

3. RESULTADOS

3.1. Modelización de la Biomasa mediante el modelo logarítmico

Los valores medidos de LAI verdadero y efectivo, así como los valores del coeficiente de retrodifusión medidos sobre la imagen, han sido utilizados en un análisis de regresión no lineal partiendo del modelo definido por la ecuación 1. Sus resultados muestran una buena relación entre los valores del coeficiente de retrodifusión y los de LAI verdadero y efectivo,

$R^2=0,93$ y $R^2=0,87$, respectivamente. Por lo que puede considerarse a este método viable para determinar valores de biomasa foliar en las cubiertas observadas.

3.2. Determinación de la rugosidad y humedad del suelo

Con el método indicado se han obtenido valores mínimos y máximos de $\sigma=0,36$ y $\sigma=2,64$, respectivamente, para las rugosidades de suelo. Simultáneamente, los valores de humedad volimétrica oscilan entre 4% y 20%. En ambos casos, todos los respectivos rangos de valores son adecuados para evaluar el modelo de retrodifusión de superficie de Dubois (Dubois *et al.*, 1995).

3.3. Parámetros biofísicos de la vegetación

La figura 3 muestra un ejemplo de fotografías hemisféricas utilizadas para calcular el LAI verdadero (LAI_v) y efectivo (LAI_{ef}) de cada dosel para cubiertas de olivar. Los resultados se resumen en la tabla 1.



Figura 3. Ejemplo de un conjunto de transectos de fotografías hemisféricas caracterizando un dosel.

Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 1, en la que pueden observarse las diferencias existentes entre los dos tipos de LAI.

Tabla 1. Índices de Área Foliar (LAI) y fracción de cubierta (f_{cov}) correspondientes a las unidades de muestreo (UM).

SECTOR/ DOSEL	LAI_{ef} ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	LAI_v ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)	f_{cov} . (%)
UM1	0,41	1,5	0,39
UM2	0,47	1	0,39
UM3	0,4	1	0,35
UM4	0,4	0,94	0,39
UM5	0,32	0,71	0,28
UM6	0,26	0,47	0,21
UM7	0,28	0,54	0,13
UM8	0,41	1,2	0,36

3.4. Coeficiente de retrodifusión simulado para la superficie del suelo con el modelo de Dubois.

La mejor simulación se ha obtenido para el estado de polarización VV ($R^2=0,88$). En la figura 4 se muestran los resultados de la regresión entre valores del coeficiente de retrodifusión para el estado de polarización VV medidos sobre la imagen RADARSAT 2 y simulados mediante el Modelo de Dubois.

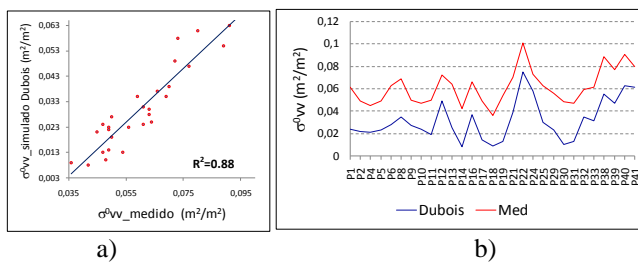


Figura 4. a) Regresión σ_{vv}^0 -Dubois/ σ_{vv}^0 -medido,
b) valores σ_{vv}^0 -Dubois (azul) vs. σ_{vv}^0 -medido (rojo).

Puede apreciarse en la figura 4.b la buena concordancia entre esos valores y en la que se observa el efecto que la capa de vegetación tiene sobre los valores medidos.

3.5. Water Cloud Model (WCM) modificado

En la tabla 2, se muestran los coeficientes obtenidos para el WCM de la ecuación 3, empleando los valores de LAI efectivo y verdadero medidos en los doseles de las diferentes UM, así como los coeficientes de regresión correspondientes a dicho análisis.

Tabla 2. Resultados del análisis de regresión no lineal para el modelo WCM.

Modelo WCM	R ²	A	B
σ_{vv}^0 , LAI _v	0,83	0,276	0,071
σ_{vv}^0 , LAI _{ef}	0,89	0,405	0,115

El LAI efectivo presenta el mejor resultado. A partir de los parámetros dados en dicha tabla y para el LAI efectivo, mediante el procedimiento inversión de la ecuación 4, se pueden generar mapas de LAI (Figura 5).

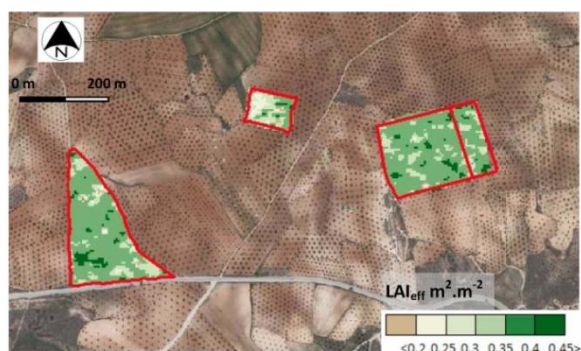


Figura 5. Mapa de LAI efectivo.

4. DISCUSIÓN

En este estudio se han utilizado como indicadores de la biomasa foliar tanto el LAI verdadero, como el efectivo. Igualmente se han evaluado dos modelos de microondas de caracterización de las cubiertas vegetales, en los que estas dos variables pueden ser extraídas para un determinado dosel. En el caso del modelo de retrodifusión logarítmico, tanto LAI efectivo como el

verdadero presentan buenos resultados, $R^2=0,87$ y $R^2=0,93$, respectivamente, aunque ligeramente superiores para el LAI verdadero. No obstante, en la segunda vía de modelización, su evaluación mediante el LAI efectivo, $R^2=0,89$, es ligeramente superior al LAI verdadero, $R^2=0,83$. Esto puede deberse a que en este modelo las propiedades geométricas de la cubierta vegetal tienen una mayor implicación, y están mejor representadas por el LAI efectivo. Para la obtención de ambas variables, la técnica de la fotografía hemisférica ha sido de gran utilidad y fiabilidad. En relación con la modelización de la superficie del suelo, en el ejemplo expuesto sobre los cultivos de olivar, el modelo de Dubois presenta un buen rendimiento para la polarización VV. Por último, este trabajo demuestra las capacidades de la imágenes SAR polarimétricas para la extracción de variables físicas y biofísicas de las cubiertas vegetales. La biomasa foliar ha quedado representada en este trabajo mediante valores de LAI.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Hallikainen, M.T. & El-Rayer, M.A. 1985. *Microwave dielectric behavior of wet soil - Part II: Dielectric mixing models*. IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing, 23, 35-46.
- Dubois, P., Van Zyl, J. & Engman, T. 1995. *Measuring soil moisture with imaging radars*. IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing, 33, 915-926.
- Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., Marliani, F. & Gai, M. 2001. *The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops*. IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing, 39, 873-884.
- Martínez, B., Camacho de Coca, F. & García-Haro, F.J. 2005. *Estimación de parámetros biofísicos de vegetación utilizando el método de la cámara hemisférica*. Revista de Teledetección, 26, 5-17.
- Saatchi, S.S. & McDonald, K.C. 1997. *Coherent effects in microwave backscattering models for forest canopies*. IEEE Transactions in Geoscience and Remote Sensing, 35, 1032-1044.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. & Fung, A.K. 1986. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume III: From Theory to Applications*. Artech House: Norwood, NJ, USA, 1065-2162.
- Wang, Y., Paris, J.F. & Davis, F.W. 1998. *Inclusion of a simple multiple scattering model into a microwave canopy backscatter model*. Remote Sensing of Environment, 63, 101-111.
- Weiss, M., Baret, F., Smith, G.J., Jonckheere, I. & Coppin, P. 2004. *Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination, Part II: Estimation of LAI, errors and sampling*. Agriculture, Forestry and Meteorology, 121, 37-53.